



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS

**“EVALUACIÓN DE LA TÉCNICA DE ELECTORREMEDIACIÓN
PARA LA RECUPERACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON
METALES PESADOS (Cd, Ni, Pb)”**

TRABAJO DE TITULACIÓN
TIPO: PROYECTO TÉCNICO

Presentado para optar el grado académico de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

AUTOR: EDER ESLEYTHER ALCIVAR PÉREZ

TUTOR: DR. FAUSTO MANOLO YAULEMA GARCÉS

Riobamba –Ecuador

2018

©2018, Eder Esleyther Alcivar Pérez

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS

El Tribunal de trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: **“EVALUACIÓN DE LA TÉCNICA DE ELECTORREMEDIACIÓN PARA LA RECUPERACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON METALES PESADOS (Cd, Ni, Pb)”**, de responsabilidad del señor Eder Esleyther Alcivar Pérez, ha sido prolijamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, quedando autorizada su presentación.

NOMBRE

FIRMA

FECHA

Dr. Fausto Manolo Yaulema Garcés

DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Dr. Julio Cesar Idrovo Novillo

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo Eder Esleyther Alcivar Pérez, soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados del presente trabajo de titulación, y el patrimonio intelectual del trabajo de titulación, pertenece a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO. Los textos constantes que son utilizados como guías en el documento están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos del presente trabajo de titulación.

Riobamba, 17 de abril de 2018.

Eder Esleyther Alcivar Pérez

C.I.2200086540

DEDICATORIA

Con todo cariño a mis padres que me han apoyado en todo momento durante la etapa de mi formación profesional, incluso en los momentos más difíciles de mi carrera dándome lo mejor de ellos con el único fin de que siga adelante hasta poder alcanzar esta anhelada meta, este logro conseguido de mi parte es para ellos también.

A mis hermanos que de una u otra forma siempre me están apoyando, gracias por compartir conmigo buenos y malos momentos todo este tiempo.

Eder Esleyther Alcivar Pérez

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios quien durante toda mi vida ha guiado mis pasos, ha sido mi fortaleza para tomar las mejores decisiones.

A mi madre, Maryuri Pérez que siempre me ha brindado lo mejor de ella sacrificándose todos los días en su trabajo para darme lo mejor y así llegar a ser un profesional ,dándome los mejores consejos, motivándome , regalándome alegrías y felicidad en todo momento durante el proceso de mi formación profesional .

A mi padre, Luver Alcivar que siempre se preocupa por mí dándome su apoyo en todo momento, regalándome los mejores consejos para que día a día me esfuerce hasta alcanzar todas las metas que me proponga en mi vida.

A toda mi familia que siempre me ha apoyado en los malos y buenos momentos de mi vida.

Al Dr. Fausto Yaulema por brindarme su amistad y haber seguido de cerca mi proyecto de trabajo de titulación brindándome sus conocimientos y apoyo para poder realizarlo.

Al Dr. Julio Idrovo por haber colaborado de gran manera respecto a mi trabajo de titulación.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por brindarme la oportunidad de obtener mi título profesional y haber enriquecido mis conocimientos por medio de sus excelentes docentes durante todo el proceso de mi formación profesional .

Eder Esleyther Alcivar Pérez

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
General.....	3
Específicos	3

CAPÍTULO I.

1	MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	4
1.1	Antecedentes de investigación	4
1.2	Marco conceptual	6
1.2.1	<i>Electrorremediación</i>	6
1.2.1.1	<i>Principio básico de la electrorremediación</i>	8
1.2.1.2	<i>Factores que influyen en el proceso de electrorremediación</i>	9
1.2.2	<i>Suelo.</i>	10
1.2.2.1	<i>Importancia del suelo</i>	11
1.2.2.2	<i>Características de los diferentes tipos de suelos</i>	12
1.2.3	<i>Contaminación de suelo con metales pesados</i>	16
1.2.3.1	<i>Plomo</i>	18
1.2.3.2	<i>Níquel.</i>	19
1.2.3.3	<i>Cadmio</i>	20

CAPÍTULO II.

2	MARCO METODOLÓGICO.	21
2.1	Tipo y diseño de investigación.	22
2.2	Unidad de análisis	22
2.3	Población de estudio	22
2.4	Tamaño de la muestra	22

2.5	Selección de la muestra	22
2.5.1	<i>Toma de muestra y caracterización del suelo</i>	22
2.6	Técnicas de recolección de datos	23
2.6.1	<i>Lugar</i>	23
2.6.2	<i>Ubicación</i>	24
2.6.3	<i>Ubicación del área contaminada</i>	25
2.6.4	<i>Diseño aplicado</i>	25
2.6.5	<i>Lugar de investigación</i>	25
2.7	Proceso experimental	26
2.7.1	<i>Preparación del electrolito</i>	26
2.7.2	<i>Medida del pH</i>	26
2.7.3	<i>Humectación y preparación de la muestra</i>	26
2.7.4	<i>Calibración del equipo</i>	26
2.8	Método estadístico	27
2.8.1	<i>Diseño experimental</i>	27

CAPÍTULO III.

3	MARCO DE RESULTADOS, DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	28
3.1	Análisis de resultados	28
3.1.1	<i>Caracterización del suelo</i>	29
3.1.2	<i>Discusión de resultados</i>	30
3.1.2.1	<i>Resultados de los tratamientos.</i>	30
3.1.2.2	<i>Resultados después del proceso de electrorremediación.</i>	30
3.1.2.3	<i>Concentración media de plomo (pb) en función de las variables</i>	32
3.1.2.4	<i>Gráficos comparativos</i>	33
3.2	Criterios de remediación o restauración del suelo	34
	CONCLUSIONES	36
	RECOMENDACIONES	38
	BIBLIOGRAFÍA.	
	ANEXOS.	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Parámetros a determinar en la caracterización del suelo.	23
Tabla 2-2. Descripción de la parroquia Taracoa	24
Tabla 2-3. Formato para un diseño factorial 2^3 con sus niveles.	28
Tabla 3-1. Resultados de la caracterización del suelo.....	29
Tabla 3-2. Condiciones de trabajo para cada uno de los siguientes tratamientos	30
Tabla 3-3. Resultado de los análisis de muestras después del proceso de electrorremediación.....	30
Tabla 3-4. Concentración media del plomo (ppm).....	32
Tabla 3-5. Concentración media del Pb en función del electrolito	32
Tabla 3-6. Concentración media del Pb en función del tiempo	32
Tabla 3-7. Concentración media de Pb en función de la distancia.....	33
Tabla 3-8. Análisis comparativo Norma Ecuatoriana de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y los resultados del proceso de electrorremediación.	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Esquema del Proceso de Electrorremediación	8
Figura 1-2. Esquema de Electrolisis del Agua.....	9
Figura 1-3. Proceso de transformación del suelo.....	11
Figura 1-4. Suelo arcilloso.	13
Figura 1-5. Suelo limoso.....	13
Figura 1-6. Suelo arenoso	14
Figura 1-7. Suelo margoso	15
Figura 1-8. Suelo margoso.....	15
Figura 1-9. Suelo pantanoso.....	16
Figura 2-1. Mapa de la Parroquia Taracoa.....	24
Figura 2-2. Esquema del proceso empleado en los experimentos.....	27

ÍNDICE DE GRÁFICO

Gráfica 3-1. Gráfica del plomo en relación Distancia * Electrolito * Tiempo (8 h).....	33
Gráfica 3-2. Gráfica del plomo en relación Distancia * Electrolito * Tiempo (24 h).....	34

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Área Contaminada.

Anexo B. Toma de muestras simples.

Anexo C. Homogenización de muestras simples.

Anexo D. Toma de muestras compuestas.

Anexo E. Rotulado de muestras compuestas.

Anexo F. Peso de muestras de suelo contaminado para agregar a la celda de electrorremediación.

Anexo G. Materiales para la elaboración de los electrolitos.

Anexo H. Peso de muestras de suelo contaminado para medir pH.

Anexo I. Muestras en reposo para medir pH.

Anexo J. Medición de pH.

Anexo K. Humectación de la muestra.

Anexo L. Muestra de suelo en reposo de 6 horas.

Anexo M. Proceso de electrorremediación.

Anexo N. Muestras para análisis de Laboratorio.

RESUMEN

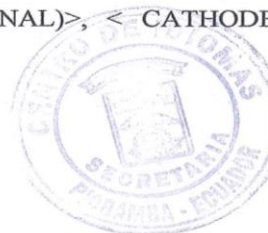
Se realizó la evaluación de la técnica de electrorremediación para la recuperación de suelos contaminados con metales pesados (Pb, Cd, Ni.), para lo cual se utilizó una celda de electrorremediación en donde se obtuvieron los potenciales de celdas, las distancias entre electrodos y el tipo de electrolito más óptimos para la restauración del suelo contaminado con metales pesados. La metodología consistió en utilizar muestras obtenidas en zonas contaminadas de metales pesados de la parroquia Taracoa para realizar el proceso de electrorremediación con diferentes condiciones experimentales: distancia entre electrodos de 5cm, 10cm, 15cm, tiempo de electrorremediación 8 horas, 24 horas y tipo de electrolito: ácido acético, ácido fosfórico. Ubicada la muestra en la celda de electrorremediación, se conecta los terminales (ánodo y cátodo) en cada electrodo el positivo en el grafito y el negativo al del hierro. Se enciende la fuente con un voltaje de 40V, que fue el voltaje utilizado para esta investigación, se considera este voltaje por investigaciones realizadas anteriormente. Los electrodos (grafito y hierro) deben ser lavados cada 4 horas después del tratamiento de electrorremediación durante de 20 segundos, se utilizó el diseño experimental factorial y Anova de un factor, se realizaron 12 experimentos con dos repeticiones. Para expresar los resultados se determinó su influencia en la concentración final de estos metales en las muestras de suelos remediados. Se comprobó que para las condiciones experimentales utilizadas el tratamiento con menor concentración después de aplicada la técnica de electrorremediación es el tratamiento T12 (15 cm, 24 horas y ácido fosfórico) para el plomo, presentan una eficiencia del 99.9% para la movilización de metales pesados, pero cabe recalcar que la distancia es la que influye en la disminución de la concentración residual del plomo en las muestras ya que es inversamente proporcional a mayor distancia menor concentración de plomo en las muestras contaminadas. Es importante seguir tomando en cuenta otros factores de versatilidad como: tipos de electrolitos, tiempos de electrorremediación, variación de voltajes, tiempos de humectación y distancia entre electrodos para futuras investigaciones.

Palabras clave: <CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES>, <ELECTRORREMEDIACIÓN>, <ELECTROLITO>, <TERMINALES>, <BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL>, <VOLTAJE>, <SUELOS CONTAMINADOS>, <ÁNODO (TERMINAL POSITIVO) >, <CÁTODO (TERMINAL NEGATIVO)>.

ABSTRACT

It has been made; the evaluation of the electroremediation technique for the recovery of contaminated soils with heavy metals (Pb, Cd, Ni₂), for which an electroremediation cell was used, obtaining the cell potentials, the distances between electrodes and the type of electrolyte more optimal for the restoration of contaminated soils with heavy metals. The methodology consisted of using samples obtained in contaminated areas with heavy metals from the Taracoa parish to perform the electroremediation process with different experimental conditions: distance between electrodes of 5cm, 10cm, 15cm, electroremediation time 8 hours, 24 hours and type of electrolyte : acetic acid, phosphoric acid. When the sample is located in the electroremediation cell, the terminals (anode and cathode) are connected in each electrode, the positive in the graphite and the negative in the iron. The source is turned on with a voltage of 40V, which was the voltage used for this investigation, this voltage is considered by previous investigations. The electrodes (graphite and iron) should be washed every 4 hours after the electroremediation treatment for 20 seconds, the experimental factorial design and Anova of one factor were used, 12 experiments were performed with two repetitions. To express the results, its influence on the final concentration of these metals in the samples of remediated soils was determined. It was verified that for the experimental conditions used, the treatment with the lowest concentration after applying the electroremediation technique is the TI2 treatment (15 cm, 24 hours and phosphoric acid) for the lead, there is an efficiency of 99.9% for the mobilization of heavy metals, but it should be emphasized that the distance is the one that influences the decrease of the residual concentration of lead in the samples since it is inversely proportional to greater distance lower concentration of lead in the contaminated samples . It is important to continue taking into account other versatility factors such as: types of electrolytes, electroremediation times, variation of voltages, wetting times and distance between electrodes for future investigations.

Keywords: <EXACT AND NATURAL SCIENCES>, <ELECTROREMEDIATION>, <ELECTROLYTES>, <ENVIRONMENTAL BIOTECHNOLOGY>, <VOLTAGE>, <CONTAMINATED SOILS>, <ANODE (POSITIVE TERMINAL)>, < CATHODE (NEGATIVE TERMINAL)>.



INTRODUCCIÓN

La mayoría de los problemas relacionados con la contaminación de metales pesados son consecuencias realizadas por las diferentes actividades humanas, en este caso las industrias mineras y petroleras generan contaminantes, los mismos dispuestos al suelo sin ningún tratamiento. Los metales pesados quedan retenidos en la estructura del suelo como partículas coloidales y por su alta movilidad en el perfil del suelo, es una amenaza mediante infiltración que contamina los acuíferos superficiales y subterráneos como también los factores ambientales flora y fauna, donde los metales pesados tienden a bioacumularse provocando un riesgo ambientales la cadena trófica y el factor humano. (Ramírez, 2007).

En Ecuador en la década de los setenta los metales pesados no se les consideraba contaminantes importantes por esta razón no se prestaba mucha atención, llegando a detectar graves problemas de salud. . (Romero Zarazúa, 2005).

La parroquia Taracoa perteneciente al cantón Francisco de Orellana en la provincia de Orellana es un ejemplo palpable de ello, a través de la cual cruzan las tuberías del oleoducto transecuatoriano, a lo largo de fincas, caminos, carreteras y poblados. Este escenario ha sido el causal de varios derrames de petróleo dando lugar a la generación de pasivos ambientales, los cuales afectan la calidad del agua, suelo, aire, y el deterioro de los ecosistemas.

El presente trabajo tiene como objetivo el estudio de la recuperación de suelos contaminados con metales pesados, los mismo que afectan a los sistemas ambientales bióticos y abióticos influyendo fundamentalmente de una forma negativa en el desarrollo de los pueblos involucrados por asumir los costos de reparación ambiental y social , actualmente los accidentes ambientales causados por derrames de petróleo que contienen compuestos orgánicos alifáticos , aromáticos y metales pesados provocan una destrucción del suelo , pese a que son sometidos a procesos de remediación muy honorosos para el país ya que quedan los metales pesados en el suelo y el único proceso para remediar los contaminantes de petróleo son los de electrorremediación por sus bajos costes y eficiencia en la degradación e incorporación de los metales pesados en los electrodos.

Debido a la contaminación por industrias petroleras existentes en los suelos de la parroquia Taracoa y consecuente generación de pasivos ambientales, los cuales son complejos y complicados de tratar por sus características físico químicas, elevados costos de control y mantenimiento, es necesario determinar un método de tratabilidad alternativo para aliviar esta problemática.

Una de las técnicas a aplicar es la electrorremediación que es una alternativa para el tratamiento y recuperación de suelos contaminados con metales pesados en el país especialmente los sectores mineros y petroleros se requiere de la aplicación e investigación de esta técnica que por considerar muchas de las variantes físico-químicas tiene un gran porcentaje de efectividad.

OBJETIVOS

General

- Evaluar la técnica de electrorremediación para la recuperación de suelos contaminados con metales pesados (Pb, Cd, Ni,).

Específicos

- Caracterizar física y químicamente el suelo contaminado con metales pesados.
- Obtener los potenciales de celdas, las distancias entre electrodos y el tipo de electrolito más óptimos para la restauración del suelo contaminado con metales pesados.
- Comprobar el grado de restauración del suelo contaminado con metales pesados.

CAPÍTULO I

1 MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1 Antecedentes de investigación

En los años setenta, los metales no se consideraban contaminantes esenciales y por lo tanto, al no dar una cuidadosa consideración al comienzo, permitieron que se produjeran verdaderos problemas en la salud. (Romero Zarazúa, 2005).

La contaminación por metales pesados en los suelos es un problema notable como resultado de la creación de desechos peligrosos que desequilibran la tierra y producen suelos con restricciones físicas, químicas y biológicas para el crecimiento de la vegetación y los peligros para el bienestar. (Carrión Coronel, 2010).

Los metales pesados constituyen un grupo cerca de los 40 elementos de la tabla periódica que tienen una densidad mayor o equivalente a 5 g / cm^3 .

El rasgo diferente de la fisiología de los metales sustanciales es que aunque un gran número de ellos son básicos para el desarrollo, por ejemplo, sodio (Na), potasio (K), magnesio (Mg), calcio (Ca), vanadio (V), manganeso (Mn), hierro (Fe), el cobalto (Co), el níquel (Ni), el Cu, el Zn y el molibdeno (Mo), también se han tenido en cuenta para afectar a las células, en su mayor parte debido a su capacidad para modificar o desnaturalizar proteínas. (Bayona Romero, 2009).

En las últimas dos décadas se ha ampliado el entusiasmo por crear innovaciones que asisten a la atención de la problemática de los suelos contaminados, la mayoría de ellos han sido encaminadas hacia las formas de remediación in situ, dentro de las cuales se ha propuesto a la electrorremediación por su capacidad para expulsar contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos. (Ramírez, 2007).

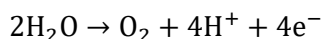
La remediación electrocinética es una técnica para recuperar los suelos que contienen metales pesados y componentes polares orgánicos mediante el paso de una corriente directa a través del suelo.

La remediación electrocinética se basa en tres principios: la electromigración, que es el transporte de iones metálicos por la atracción del electrodo cargado negativamente; la electroósmosis, que es el

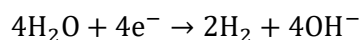
movimiento de moléculas de agua desde el ánodo al cátodo durante la electrólisis y la electroforesis, que es el movimiento de partículas cargadas bajo una corriente eléctrica.

El mecanismo básico empleado en la remediación electrocinética de suelos contaminados con metales es la oxidación en el ánodo y la reducción en el cátodo. (Elsayed et al., 2011).

La oxidación del agua en el ánodo provoca la disposición de H^+ , que se desplaza al cátodo:



En el cátodo, la reducción de agua resulta en la formación de iones hidróxido, los cuales migran al ánodo:



Los iones H^+ se mueven significativamente más rápido que los iones OH^- . Por lo tanto, a medida que los iones de OH^- producidos en el cátodo avanzan hacia el ánodo, experimentan el frente ácido hecho por los iones H^+ , provocando la precipitación de óxidos metálicos cerca del cátodo.

La adición de un ácido al suelo neutraliza algunos de los iones OH^- formados en el cátodo. La neutralización de los iones OH^- podría ayudar en el transporte efectivo de iones metálicos al cátodo minimizando la cantidad del precipitado. (Reddy, 2008).

Los metales tratados normalmente con esta innovación son Cd, Cu, Pb, Zn, Co, Cr y As. Los experimentos pueden tomar 1 y 10 días de tratamiento, y se ha descubierto por regla general la dirección y extensión de la migración de los contaminantes y su remoción depende de la polaridad del contaminante, el tipo de suelo y de la duración del tratamiento

Las corrientes utilizadas como parte de esta técnica son bajas (en la solicitud de un segmento transversal mA / cm²) y una baja inclinación de potencial (a petición de 1,0 V / cm distancia entre electrodos) en la que los terminales se introducen en el suelo.

Los contaminantes se eliminan mediante estrategias como: electroplating, adsorción sobre el electrodo, precipitación en el electrodo, dirección de agua cerca del electrodo o con secciones de intercambio de partículas (Al-Hamdan, 2008).

Tal como lo indican (Ramírez, 2007) en investigaciones anteriores sobre la electrorremediación, este sistema ha demostrado su capacidad para evacuar algunos contaminantes orgánicos como: tricloroetileno e hidrocarburos, ya sea en los estudios de laboratorio, a nivel piloto o de campo, sin embargo, su aplicación fundamental ha sido en suelos contaminados con metales, para expulsar elementos como: Cr, Cd, Hg, Pb, Mn, Zn y As.

En algunas investigaciones, la utilización de la electrorremediación ha permitido lograr eficiencias de evacuación cercanas al 100%, principalmente si la contaminación es causada por un solo metal. En las aplicaciones en campo, los resultados han sido variables dependiendo del tipo de suelo, el tipo de contaminante y la variante tecnológica utilizada (Ramírez, 2007).

De acuerdo con (García Hernández Laura, 2011), se realizó un estudio potencioestático en una celda de electrorremediación exploratoria, de un suelo arenoso genuino (93% de arena) degradado por la oxidación de depósitos mineros de la zona de Zimapán Hidalgo, agua desionizada, CH_3COOH y $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 0,001 M, ya sea como un humectante del suelo o como electrolitos, se conectó una capacidad consistente de 20 V durante 24 horas. Al terminar los experimentos se recuperó el suelo, se determinó el pH, observándose que el suelo presenta una gran capacidad de amortiguamiento. La conductividad eléctrica mostró una disminución en el suelo y un incremento en los electrolitos, que se atribuyó a la migración iónica de los contaminantes debido a la carga del potencial eléctrico; hacia el final de los tratamientos se logró una evacuación del 12% (98 ppm) para Pb, 20% (7 ppm) para Cd y 22% para As (79 ppm).

1.2 Marco conceptual

1.2.1 Electrorremediación

La electrorremediación es una tecnología utilizada para restaurar suelos contaminados, se basa en la generación de un campo eléctrico mediante una matriz de electrodos en un suelo contaminado saturado.

Algunos autores pueden definirla como la aplicación de una diferencia de potencial, o una corriente continua, que requiere el uso de electrodos (ánodo y cátodo) colocados en pozos excavados en el suelo, por lo general estos son humedecidos con un electrolito para mejorar las condiciones de conducción del campo eléctrico. La adición del electrolito hace posible el transporte del contaminante

a los pozos donde se extraerá. Al contrario del arrastre de fluidos, esta técnica permite establecer una migración dirigida, la cual evita la dispersión del contaminante fuera de la zona de tratamiento.

Las especies cargadas presentes en el suelo migran bajo la acción de este campo. Las cargas positivas se movilizan hacia el cátodo y se acumulan en el mismo, y las negativas en el ánodo. La oxidación de agua en el ánodo genera protones H^+ , que se mueven hacia el cátodo creando un frente ácido. Este favorece la desorción de los cationes del suelo y fuerza la puesta en disolución de contaminantes precipitada como carbonatos, hidróxidos, etc. Por otro lado, los iones OH^- generados en el cátodo por la reducción del agua provocan la precipitación de los metales (Ciencias Ambientales, 2006).

La técnica resulta eficaz para el tratamiento de suelos de baja permeabilidad hidráulica que son difíciles de recuperar por otros medios y está especialmente indicada para metales solubles o complejos en el suelo en forma de óxidos, hidróxidos y carbonatos. Sus ventajas incluyen bajo consumo energético, un control sobre la dirección del flujo del agua y de los contaminantes disueltos y la acumulación de los contaminantes en los electrodos para su posterior eliminación utilizando resinas de intercambio iónico o mediante bombeo invirtiendo la polaridad durante pequeños intervalos de tiempo. (Pazos et al., 2006).

La electrorremediación puede utilizarse in situ. Aunque se desarrolló para el tratamiento de suelos contaminados con metales pesados, experimentos realizados han puesto de manifiesto que la electrorremediación puede ser utilizada para la eliminación de compuestos orgánicos y que puede combinarse con otras técnicas como la biodegradación.

El núcleo de una instalación electrocinética in situ; consiste en una serie de electrodos y sus alojamientos. Estos pueden ser instalados, en principio, a cualquier profundidad, tanto vertical como horizontalmente. Aunque los alojamientos del cátodo y ánodo se conectan entre sí, éstos forman dos sistemas de circulación separados (uno para el ánodo, otro para el cátodo) que se rellenan de diferentes soluciones químicas.

Es en estas disoluciones en las que se capturan los contaminantes, los cuales se conducen posteriormente a un sistema de tratamiento conectado al sistema de circulación.

Una celda electrolítica es un sistema que incluye una fuente de energía (corriente eléctrica), dos electrodos y una solución electrolítica en la que tiene lugar el flujo de iones (electromigración). (Celis Rosas, 2015).

El electrodo con carga negativa, cuando se aplica la corriente eléctrica, será llamado cátodo, siendo el ánodo positivo. La dirección convencional de la corriente aplicada es desde el ánodo hasta el cátodo, en el cojinete opuesto al movimiento de electrones en los electrodos. En la matriz del suelo, los iones positivos presentes en el agua de saturación (electrolito) se mueven hacia el cátodo; los iones negativos, por otra parte, se desplazan hacia el ánodo. Este movimiento de iones bajo un campo eléctrico es lo que se llama electromigración.

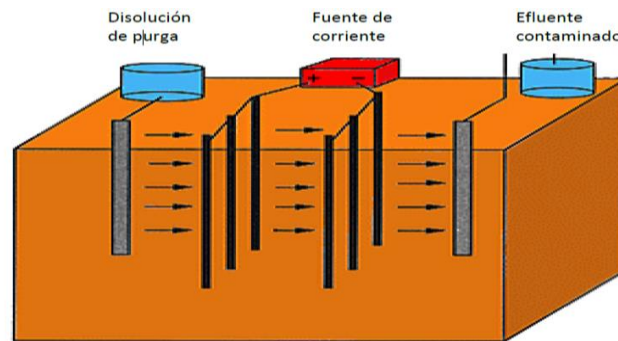


Figura 1-1. Esquema del Proceso de Electrorremediación

Fuente: (Xavier Domenech 1995).

La descontaminación electrocinética tratará de potenciar los fenómenos de electromigración para dar lugar a la movilidad de los contaminantes (en forma de especies cargadas). Los contaminantes movilizados serán atrapados, como ya se ha indicado, en las correspondientes soluciones anódica y catódica que serán evacuadas del suelo.

1.2.1.1 Principio básico de la electrorremediación

El principio en que se basa la electrorremediación es la electrólisis, proceso en que las reacciones redox sólo tienen lugar si se les suministra energía por medio de una corriente eléctrica aplicada desde el exterior, que significa separación por electricidad.

La electrólisis se realiza en las celdas electrolíticas, que son unos depósitos que contienen el electrolito disuelto o fundido y dos electrodos. Los electrolitos disueltos o fundidos conducen la corriente eléctrica por medio de los iones positivos y negativos, al mismo tiempo que se produce algún cambio químico en los electrodos. En cada electrodo de una celda electrolítica se produce una de las reacciones del proceso redox:

- En el cátodo o electrodo negativo se descargan los cationes. Se produce reducción.
- En el ánodo o electrodo positivo se descargan los aniones. Se produce oxidación.

Un ejemplo importante de este tipo de proceso es la electrólisis del agua. El agua es una sustancia muy estable que se descompone en sus elementos mediante corriente eléctrica.

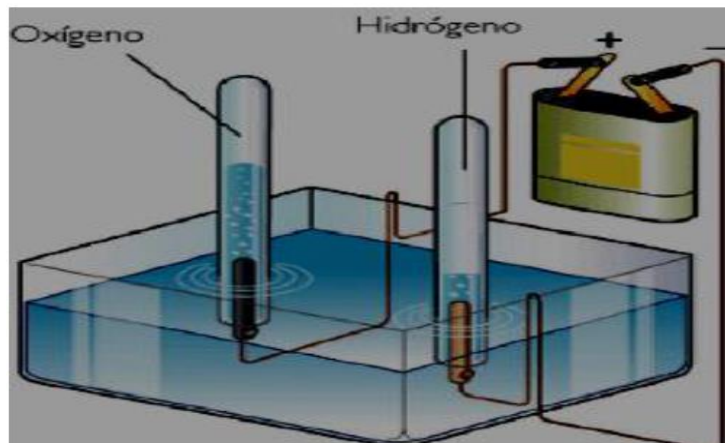


Figura 1-2. Esquema de Electrólisis del Agua

Fuente: www.unrobotica.com/hidrogeno/hidrogeno.htm

La electrólisis del agua para suministrar hidrógeno y oxígeno se confirma al pasar una corriente a través de una disposición de fluido. De esta manera, mientras se carga un acumulador de plomo o de "carga", se suministran mezclas peligrosas de H_2 y O_2 debido a la corriente de corriente a través de la disposición en la batería. Esa es la razón por la cual es interesante no producir chispas cerca de ella al realizar este procedimiento.

1.2.1.2 Factores que influyen en el proceso de electrorremediación

Unos pocos factores fisicoquímicos influyen en el vehículo de las toxinas y posteriormente en el remediación viable de suelos contaminados; estos elementos se comunican a partir de la siguiente manera. (Celis Rosas, 2015).

- a) **pH.-** Promueve reacciones de los metales con sustancias que se encuentran en el suelo. Regula la movilidad de los contaminantes en el proceso de electrorremediación, de existir metales pesados absorbidos, estos son solubilizados por el frente ácido y transportado hacia el cátodo.
- b) **Contenido de agua.-** Genera el movimiento del electrolito, el nivel de saturación del suelo es básico para el procedimiento de electrorremediación.
- c) **Conductividad eléctrica.-** Es la capacidad de un medio o espacio físico para permitir el paso de corriente eléctrica, para cada tipo de suelo hay un valor de conductividad eléctrica. En electrorremediación los cambios de pH del suelo modifican la conductividad global del medio por lo que se forman perfiles de voltaje. En experimentos con suelos contaminados se incrementa con tiempo, debido a la penetración de los frentes ácido y alcalino, y la solubilidad de las especies iónicas o el aumento de la temperatura.
- d) **Potencial zeta.-** Se la define como la medida que determina la carga de un coloide, en función de la naturaleza y superficie, composición del medio en que está suspendido.
- e) **Naturaleza y química del suelo.-** En electrorremediación de suelos contaminados influyen las siguientes características del suelo: la capacidad de adsorción; intercambio iónico y de amortiguamiento del pH en el caso de suelos arcillosos y limosos por su mayor superficie de contacto, lo que permite una mayor facilidad en la adsorción.
- f) **Naturaleza del contaminante.-** El tipo El tipo de contaminante influye significativamente en la técnica de electrorremediación, los contaminantes pueden ser sólidos precipitados, disueltos y adsorbidos a partículas del suelo o adsorbidos en materia orgánica.
- g) **Naturaleza y arreglo de los electrodos.-** La estructura de los electrodos debe ser porosa que permita un buen contacto con los electrolitos y para poder liberar los gases producidos por la electrólisis. La forma, tamaño y arreglo de los electrodos, la distancia entre ellos afectan la tasa de remoción de contaminantes.

1.2.2 Suelo.

El suelo, la capa más superficial de la corteza terrestre, constituye uno de los recursos naturales más importantes con el que contamos al ser el sustrato que sustenta la vida en el planeta. Desde el punto de vista edáfico, un suelo es un cuerpo natural tridimensional formado por la progresiva alteración física y química de un material original o roca madre a lo largo del tiempo, bajo unas condiciones climáticas y topográficas determinadas y sometido a la actividad de organismos vivos.

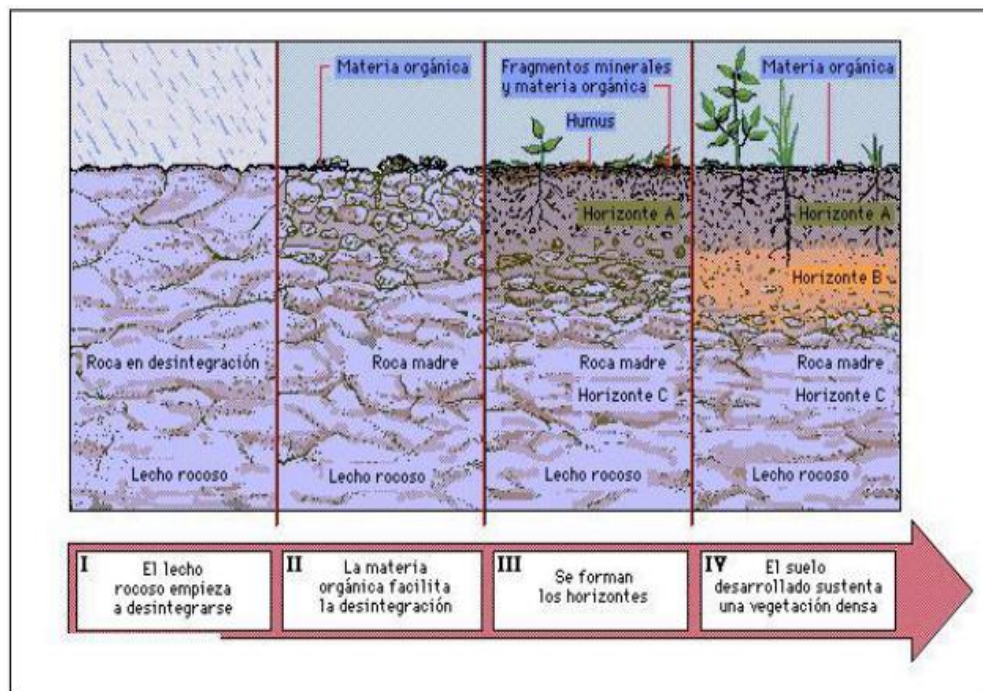


Figura 1-3. Proceso de transformación del suelo

Fuente: www.botanical.onlinecom

A lo largo de su desarrollo o edafogénesis, las capas verticales de la mayor parte de materiales no unidos llamados horizonte, enmarcadas por componentes minerales y naturales, agua y gases, y caracterizados por propiedades físicas (estructura, textura, porosidad, capacidad de retención de agua, densidad aparente), químicas y físico-químicas (pH, potencial redox, capacidad de intercambio catiónico) que los diferencian entre sí y del material original. El conjunto de horizontes constituye el perfil del suelo y su estudio permite dilucidar los procesos de formación sufridos durante su evolución y llevar a cabo su clasificación dentro de las distintas unidades de suelos.

1.2.2.1 Importancia del suelo

La importancia del suelo radica en que es un elemento natural dinámico y vivo que constituye la interfaz entre la atmósfera, la litósfera, la biósfera y la hidrósfera, sistemas con los que mantiene un continuo intercambio de materia y energía. Esto lo convierte en una pieza clave del desarrollo de los ciclos biogeoquímicos superficiales y le confiere la capacidad para desarrollar una serie de funciones esenciales en la naturaleza de carácter medioambiental, ecológico, económico, social y cultural:

- El suelo proporciona los nutrientes, el agua y el soporte físico necesarios para el crecimiento vegetal y la producción de biomasa en general, desempeñando un papel fundamental como fuente de alimentación para los seres vivos.
- Es una parte básica del ciclo hidrológico, actuando como elemento distribuidor de las aguas superficiales y contribuyendo al almacenaje y recarga de las aguas subterráneas.
- Es el hábitat natural biológico de muchos organismos de todo tipo y constituye un elemento de reserva genética.
- Sirve como una etapa para la mejora de las actividades humanas como una ayuda para la estructura socioeconómica y forma parte del paisaje y del patrimonio cultural.
- El suelo es un elemento frágil del medio ambiente, un recurso natural no renovable puesto que su velocidad de formación y regeneración es muy lenta mientras que los procesos que contribuyen a su degradación, deterioro y destrucción son mucho más rápidos. Por ello, es de suma importancia concienciar a la opinión pública sobre este aspecto y establecer medidas ambientales y políticas de actuación que garanticen la protección y conservación de los suelos. (FAO-PNUMA, 1983).

1.2.2.2 Características de los diferentes tipos de suelos

Existen los diferentes tipos de suelos:

Suelos arcillosos: Principalmente formados por arcillas. La arcilla comprende básicamente silicato de aluminio hidratado. Es una especie de suelo que, cuando está mojado o húmedo, es pegajoso, pero cuando está seco es fino y delicado, ya que la arcilla está formada por partículas diminutas de menos de 0,005 milímetros de distancia. (Celis Rosas, 2015).

Desde un punto de vista de la textura, tiene consistencia plástica y puede ser modelado. Son suelos que, para la agricultura, se conocen como suelos húmedos y pesados. Son muy impermeables dado que no dejan pasar el agua o el aire, todo ello propicia que sean suelos donde el agua se estanque con facilidad por lo que en este tipo de suelo se necesita realizar un sistema de drenaje adecuado porque, después de las lluvias el agua queda retenida en la superficie. Presentan un color marrón oscuro. (Celis Rosas, 2015).

Los suelos arcillosos, al secarse, quedan muy compactos y duros y se caracterizan por la aparición de grietas. La ventaja principal es que son suelos que conservan fácilmente la forma que se le da al trabajarlos.



Figura 1-4. Suelo arcilloso.

Fuente: www.botanical-online.com

Suelos limosos: Son suelos que contienen una gran extensión de limo. Es un tipo de suelo excepcionalmente conservador, sin llegar a ser tanto como los arcillosos. Estos suelos resultan de la sedimentación de materiales finos transportados por el agua o almacenados por el viento. Aparecen regularmente a lo largo de los ríos y son excepcionalmente fructíferos. Se trata de suelos limosos, ya que, al igual que los arcillosos, ya que permiten elaborar bolas a pesar de que se rompen con eficacia. A diferencia de los arcillosos, que no permiten elaborar cintas entre los dedos.



Figura 1-5. Suelo limoso

Fuente: www.botanical-online.com

Suelos arenosos: El suelo arenoso está formado en su mayor parte por la arena. La arena son pequeñas partículas de piedra de carácter silicio con un diámetro en las proximidades de (0,02 y 2) mm. Los suelos arenosos no mantienen el agua rápidamente se hunde a capas adicionales.

A diferencia de los suelos anteriores requieren un riego continuo y un trabajo constante para darle una forma determinada porque la pierden con facilidad. Presentan colores claros.

Sabemos que se trata de este tipo de suelo porque al coger un poco de él entre los dedos, somos incapaces de formar una bola. Este tipo de suelo, por mucho que lo manipulemos, seguirá estando suelto.



Figura 1-6. Suelo arenoso

Fuente: www.botanical-online.com

Suelos margosos: El suelo margoso es un suelo compuesto de arcilla, limo y arena con abundante cantidad de materia vegetal descompuesta (humus). Se trata de un suelo que presenta un color oscuro poco apelmazado y ligero.

Podemos afirmar que presenta las características positivas de los tres suelos anteriores: mantiene la suficiente humedad pero, al mismo tiempo, permite la permeabilidad hacia las capas inferiores. Es el tipo de suelo preferido por los jardineros.



Figura 1-7. Suelo margoso

Fuente: www.botanical-online.com

Suelos gredosos: Un suelo gredoso es aquel que procede de la descomposición de las cretas o piedras calizas que contienen mucho carbonato cálcico. Es un tipo de tierra ligero y con un buen drenaje. Presenta un color marrón claro o blanquecino.



Figura 1-8. Suelo margoso

Fuente: www.botanical-online.com

Suelos pantanosos: Se considera que un suelo es pantanoso a aquel que se ha formado en lugares que se encuentran habitualmente inundados. Son suelos que tienen muy poca riqueza mineral y con una acidez muy elevada. Su color es negro.



Figura 1-9. . Suelo pantanoso

Fuente: www.botanical-online.com

1.2.3 Contaminación de suelo con metales pesados

Metales pesados son aquellos cuya densidad es por lo menos cinco veces mayor que la del agua. Tienen aplicación directa en numerosos procesos de producción de bienes y servicios.

Los más importantes son:

Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Mercurio(Hg), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Estaño (Sn) y Zinc (Zn).

Los metales tóxicos son aquellos cuya fijación en la naturaleza puede hacer daño al bienestar de las personas. Los términos metales pesados y metales tóxicos se utilizan sinónimamente sin embargo sólo algunos de ellos tienen un lugar con ambos grupos.

Algunos metales son indispensables en bajas concentraciones, ya que forman parte de sistemas enzimáticos, como el cobalto, zinc, molibdeno, o como el hierro que forma parte de la hemoglobina. Su ausencia causa enfermedades, su exceso intoxicaciones.

El desarrollo tecnológico, el consumo masivo e indiscriminado y la producción de desechos principalmente urbanos, ha provocado la presencia de muchos metales en cantidades importantes en el ambiente, provocando numerosos efectos sobre la salud y el equilibrio de los ecosistemas. Se incorporan con los alimentos o como partículas que se respiran y se van acumulando en el organismo,

hasta llegar a límites de toxicidad. Si la incorporación es lenta se producen intoxicaciones crónicas, que dañan los tejidos u órganos en los que se acumulan.

Se considera metal pesado a aquel elemento que tiene una densidad igual o superior a 5 gr/cm³ cuando está en forma elemental, o cuyo número atómico es superior a 20 (excluyendo a los metales alcalinos y alcalino-térreos). Su presencia en la corteza terrestre es inferior al 0.1%. Junto a estos metales pesados hay otros elementos químicos que aunque son metales ligeros o no metales se suelen englobar con ellos por presentar orígenes y comportamientos asociados; es este el caso del As, B, Ba y Se.

Dentro de los metales pasados hay dos grupos:

- Oligoelementos o micronutrientes, que son los requeridos en pequeñas cantidades, por plantas y animales, y son necesarios para que los organismos completen su ciclo vital. Pasado cierto umbral se vuelven tóxicos. Dentro de este grupo están: As, B, Co, Cr, Cu, Mo, Mn, Ni, Se y Zn.
- Metales pesados sin función biológica conocida, cuya presencia en determinadas cantidades en seres vivos lleva aparejadas disfunciones en el funcionamiento de sus organismos. Resultan altamente tóxicos y presentan la propiedad de acumularse en los organismos vivos. Son, principalmente: Cd, Hg, Pb, Cu, Ni, Sb, Bi.

En los suelos, los más abundantes son Mn, Cr, Zn, Ni y Pb (1 a 1500) mg / kg; el Mn puede alcanzar 10000 mg / kg. En concentraciones menores están Co, Cu y As (0,1 a 250) mg / kg y con menores porcentaje el Cd y Hg (0,01 a 2) mg / kg, según (Morales Fonseca Diana Milena, 2008)

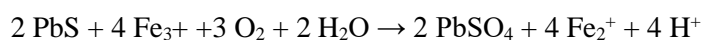
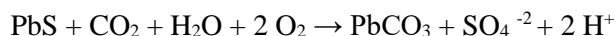
El contenido de metales pesados en suelos, debería ser únicamente función de la composición del material original y de los procesos edafogénicos que dan lugar al suelo. Pero la actividad humana incrementa el contenido de estos metales en el suelo en cantidades considerables, siendo esta, sin duda, la causa más frecuente de las concentraciones tóxicas.

De hecho esto sucede debido a los vertidos de origen antropogénico, procedentes de vertidos industriales, de actividades mineras, de la aplicación de plaguicidas o también del tráfico rodado. Como resultado, se emiten grandes cantidades de partículas que, después de un cierto tiempo de permanencia en la atmósfera, precipitan en los suelos lejos del lugar donde han sido vertidas. (Bautista Francisco, 2011).

En la presente investigación los metales elegidos para evaluar la electrorremediación fueron plomo, cadmio y níquel, ya que en su contenido presente en las muestras utilizadas superan los límites máximos permitidos por la NORMA ECUATORIANA DE CALIDAD AMBIENTAL DEL RECURSO SUELO Y CRITERIOS DE REMEDIACIÓN PARA SUELOS CONTAMINADOS, LIBRO VI ANEXO 2.

1.2.3.1 Plomo

El plomo está disponible en un gran número de minerales, siendo la forma más ampliamente reconocida el sulfuro de plomo (galena: PbS). El plomo es un metal difícilmente movilizable, y bajo condiciones oxidantes la galena da origen a minerales tales como la cerusita y anglesita:



El particulado de plomo identificado con cuestiones metalúrgicas constituye el principal problema, pero hay diferentes fuentes que además incluyen una peligrosidad extrema.

En la década de 1990 se encontró en la ciudad de Antofagasta (Chile) que había niños que tenían cantidades elevadas de plomo en su sangre. La fuente del problema pudo resolverse, y fueron minerales y concentraciones de plomo que se almacenaban sin protección en las instalaciones portuarias (referentes con Bolivia), para su envío posterior. Esto nos lleva a mirar no solo a las fundiciones, sino también a los territorios donde se acumulan minerales o concentrados de plomo. El particulado fino de plomo (10 a 100) μm puede estar en gran medida peligroso por las siguientes razones:

- Se adhiere con mayor firmeza a la piel.
- Es más soluble que las partículas gruesas en el tracto gastrointestinal.
- Se ingiere fácilmente a través del sistema respiratorio.
- En los adultos que trabajan en situaciones presentadas a la contaminación por plomo, el metal puede acumularse en los huesos, donde su vida media es más notable que 20 años. La osteoporosis, el embarazo o las enfermedades interminables pueden hacer que este plomo se

integre más rápido en la sangre. Los problemas identificados con la sobreexposición de plomo en los adultos incluyen:

- Daño a los riñones.
- Daño al tracto gastrointestinal.
- Daño al sistema reproductor.
- Daño en los órganos productores sangre.
- Daño neurológico.
- Abortos.

1.2.3.2 *Níquel.*

El níquel es uno de los componentes más abundantes del planeta, que representa alrededor del 0,008% de la superficie de la Tierra y el 0,01% de las rocas ígneas. En algunos tipos de meteoritos hay cantidades apreciables de níquel, y se piensa que existen grandes cantidades en el núcleo terrestre. Dos minerales importantes son los sulfuros de hierro y níquel, pentlandita y pirrotita $(\text{Ni, Fe}) \times \text{S}_y$; el mineral garnierita, $(\text{Ni, Mg}) \text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, el níquel se presenta en pequeñas cantidades en plantas y animales. Está presente en pequeñas cantidades en el agua de mar, el petróleo y en la mayor parte del carbón.

El níquel también puede existir en los estados de oxidación 0, 1^+ , 3^+ , 4^+ . Además de los compuestos simples o sales, el níquel forma una variedad de compuestos de coordinación o complejos. La mayor parte de los compuestos de níquel son verdes o azules a causa de la hidratación o de la unión de otros ligandos al metal. El ion níquel presente en soluciones acuosas de compuestos simples es a su vez un complejo.

- Efectos ambientales del níquel

El níquel es liberado al aire por las plantas de energía y los incineradores de residuos. Esto se depositará en el suelo o caerá después de reaccionar con gotas de lluvia. Usualmente lleva un largo periodo de tiempo para que el níquel sea eliminado del aire. El níquel también puede terminar en la superficie del agua cuando se trata de una parte de las aguas residuales. La mayor parte de todos los

compuestos del níquel que son liberados al ambiente se absorberán por los sedimentos o partículas del suelo y llegará a inmovilizarse. En suelos ácidos, el níquel se une para llegar a ser más móvil y a menudo alcanza el agua subterránea.

No hay mucha información disponible sobre los efectos del níquel sobre los organismos y los humanos. Sabemos que altas concentraciones de níquel en suelos arenosos puede claramente dañar a las plantas y altas concentraciones de níquel en aguas superficiales puede disminuir el rango de crecimiento de las algas. Microorganismos pueden también sufrir una disminución del crecimiento debido a la presencia de níquel, pero ellos usualmente desarrollan resistencia al níquel. Para los animales el níquel, es un elemento esencial en pequeñas cantidades. Pero el níquel no es sólo favorable como elemento esencial; puede ser también peligroso cuando se excede la máxima cantidad tolerable. Esto puede causar varios tipos de cánceres en diferentes lugares de los cuerpos de los animales, mayormente en aquellos que viven cerca de refinerías. No es conocido que el níquel se acumule en plantas o animales. Como resultado el níquel no se biomagnifica en la cadena alimentaria.

1.2.3.3 Cadmio

Los minerales de cadmio, no se encuentran en concentraciones y cantidades suficientes como para justificar una actividad minera específica por el elemento. Entre los minerales de cadmio, la greenockita (CdS) es el más común. Este mineral se encuentra casi siempre asociado con la esfalerita (ZnS). De esta manera, el cadmio se recupera principalmente como un subproducto de la minería, fundición, y refinación del zinc, y en menor grado de la del plomo y cobre. En promedio se recuperan unos 3 kg de cadmio por tonelada de zinc.

De esta forma, el cadmio se recupera básicamente como un subproducto de la minería, purificación y refinación del zinc, y en menor grado el plomo y el cobre.

En todo caso, alrededor de 3 kg de cadmio se recuperan por cada tonelada de zinc. Por medio de su toxicidad, el cadmio se encuentra expuesto a una de las legislaciones más estrictas en términos ambientales y de salud humana. En la vida acuática, el cadmio puede integrarse a los peces a través de dos rutas principales:

- Ingestión
- Introducción en las agallas.

En el caso de las personas, el cadmio se puede obtener de dos maneras: la ingestión e inhalación. Sus efectos pueden dividirse en dos clasificaciones:

Agudos: fiebre causada por una exposición severa; las manifestaciones son iguales a las del virus de la gripe; en 24 horas suele crearse un edema aspiratorio agudo, que alcanza su máximo en 3 días; si no sobreviene la muerte por asfixia, el problema puede resolverse en una semana.

Crónicos: El resultado más serio del envenenamiento por cadmio es el cáncer. Los efectos crónicos que primero se observan son daño en los riñones. Se piensa que el cadmio es también el causante de enfisemas pulmonares y enfermedades de los huesos (osteomalcia y osteoporosis).

CAPÍTULO II

2 MARCO METODOLÓGICO.

2.1 Tipo y diseño de investigación.

Se procederá a la revisión de trabajos realizados a nivel internacional de electrorremediación como son artículos científicos, para comparar con datos obtenidos con distintos suelos estudiados, de tipo explicativa debido a la interpretación de los efectos causales de las variables independientes sobre la variable dependiente.

En la cuba de remediación se colocará los electrodos (ánodo y cátodo) a tres diferentes distancias (5, 10, 15 cm) y a dos diferentes tiempos como son 8 y 24 horas, dos electrolitos para la migración de los metales pesados.

2.2 Unidad de análisis

La unidad de análisis para este proyecto es de 1 kg de suelo contaminado por replica y tratamiento.

2.3 Población de estudio

La población de estudio es el área contaminada que cubre una región de 650 m².

2.4 Tamaño de la muestra

Aproximadamente 25 kg de suelo contaminados con metales pesados fueron recolectados de la zona a ser tratada para la determinación de pruebas en los laboratorios.

2.5 Selección de la muestra

2.5.1 Toma de muestra y caracterización del suelo

El muestreo desarrollado para esta investigación fue el aleatorio simple ya que este se caracteriza porque cualquier punto de muestreo presenta la misma probabilidad de ser seleccionado que los restantes puntos de muestreos.

- Se adecuó el terreno haciendo un recorrido y verificando que no haya componentes adversos que puedan interceder en el muestreo como los residuos sólidos.
- Se determinó el área del suelo contaminada que abarca una extensión de 650 m², y a una profundidad de 30cm.
- Se recolectaron aproximadamente 20 submuestras en el área contaminada.
- Se tomaron 2 muestras compuestas a 30 cm de profundidad a partir de las 20 submuestras de 1kg aproximadamente cada una, homogenizadas correspondientemente, y se procedió al rotulado de las mismas.
- Las muestras obtenidas se colocaron en fundas ziploc y se guardaron en un termo a baja temperatura para luego ser trasladadas al laboratorio (AQLAB) evitando la volatilización de los contaminantes en el suelo.
- Los análisis correspondientes, se determinaron en base a la norma de calidad ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados del libro VI anexo 2 tabla 3.

Tabla 2-1. Parámetros a determinar en la caracterización del suelo.

PARÁMETROS	MÉTODO DE ENSAYO	REFERENCIA
Color	ITE-AQLAB-61	Munsell soil color charts
Conductividad Eléctrica	ITE-AQLAB-53	EPA 9050 ^a
Humedad	ITE-AQLAB-57	ASTM D3976-92
Potencial de Hidrógeno	ITE-AQLAB-52	EPA 9045 D
Cadmio , Níquel , Plomo	ITE-AQLAB-33	EPA 3050B, SM 3030B, 3111B
Textura	ITE-AQLAB-62	Gravimétrico
Granulometría	ITE-AQLAB-74	> 2 mm
		> 1 mm
		> 0,5 mm
		< 0,5 mm

Elaborado por: (Eder Alcivar, 2017).

Fuente: laboratorio AQLAB.

2.6 Técnicas de recolección de datos

2.6.1 Lugar

La parroquia Taracoa, ubicada a 36 kilómetros al sur de Puerto Francisco de Orellana (Coca), está formado en su mayoría por 8 barrios y una población de 2000 habitantes, se encuentra en un territorio petrolero del 80%, el resto de la población se ocupada de ganadería y agricultura.

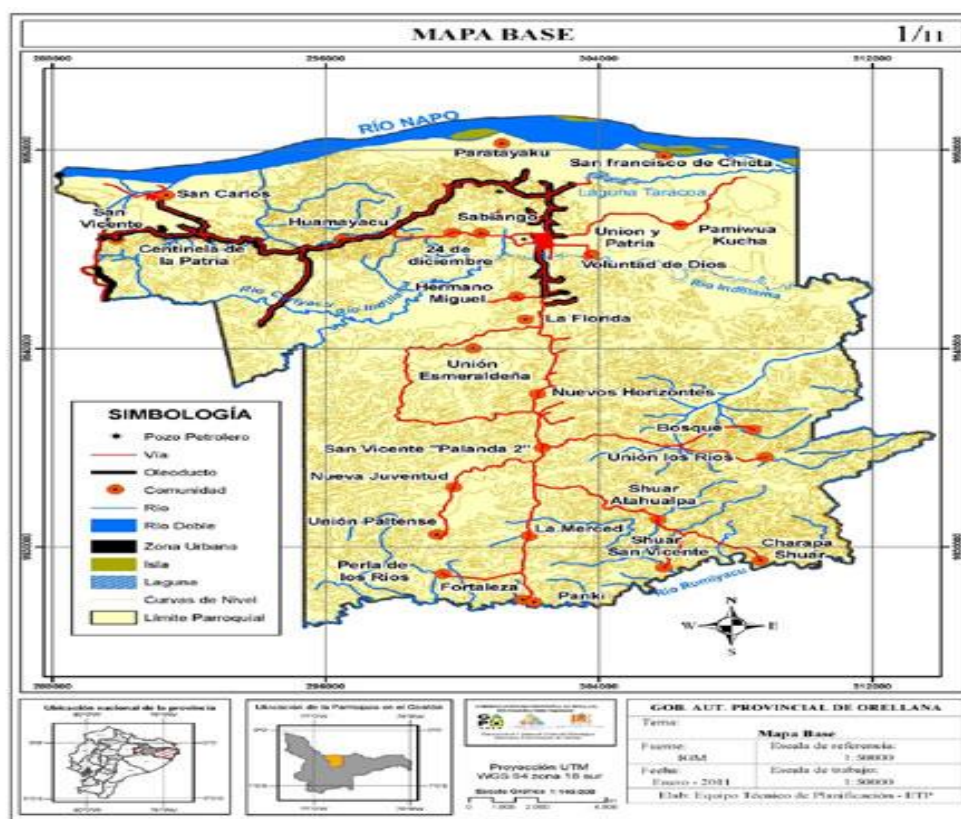


Figura 2-1. Mapa de la Parroquia Taracoa

Fuente: (TARACOA, gobierno parroquial, 2014)

2.6.2 Ubicación

Se encuentra localizada en las coordenadas UTM, Este: 301154.54 m E, Norte: 9843281.35 m S.

Tabla 2-2. Descripción de la parroquia Taracoa

PROVINCIA	CANTÓN	PARROQUIA
Orellana	Fco. de Orellana	Taracoa
LIMITES		
Norte	Cantón Joya de los Sachas	
Sur	Parroquia Dayuma	
Este	Parroquia Alejandro Labaka Y Parroquia Dayuma	

Oeste	Parroquia Dayuma, Parroquia El Dorado y Parroquia Pto. Francisco de Orellana	
CARACTERÍSTICAS GENERALES		
	INDICADOR	VALOR
Población	Habitantes	2000
Altitud	m.s.n.m	233-372
Clima	Estación	Magnético lluvioso
Temperatura	°C	28-33
Precipitación (anual)	mm	2000-3000

Elaborado por: (Eder Alcivar, 2017)

Fuente: (junta parroquial de Taracoa, 2015)

2.6.3 Ubicación del área contaminada

- Longitud: - 76,777406
- Latitud: - 0,489978
- Geo referencia: El área contaminada se encuentra ubicada a 250 metros del centro poblado de Taracoa vía La Primavera.

La investigación se realizó mediante la observación directa de los hechos, en las que se observa el caso, tomando los datos adecuados para registrarla y adquirir una comprensión y / o análisis del caso.

Como se indica en (Morán, 2007) la observación directa es la capacidad de percibir información del medio del espectáculo, en vista de la motivación de generar registros para comprender los fenómenos más adelante, a lo largo de estas líneas se producen resultados absolutamente sorprendentes en la investigación.

2.6.4 Diseño aplicado

El diseño aplicado es totalmente al azar, que consiste en nombrar los tratamientos totalmente aleatorios a las unidades experimentales, el diseño se asocia a los arreglos de tratamiento de tipo factorial.

2.6.5 Lugar de investigación

La presente investigación se elaboró en el laboratorio de impactos ambientales en la facultad de ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo “ESPOCH”

2.7 Proceso experimental

2.7.1 Preparación del electrolito

El electrolito se prepara de la siguiente manera:

Se calcula la cantidad de ácido fosfórico (H_3PO_4) al 0.01 M y de ácido acético (CH_3COOH) al 0.3 M que se necesita para el procedimiento. La cantidad de ácido que se necesita se mide en una pipeta de 10 ml con la guía de una pera, se coloca previamente en un balón aforado una medida específica de agua destilada para amortiguar la reacción del ácido concentrado (nunca se agrega agua al ácido, sino ácido al agua para evitar reacciones explosivas) para terminar el aforo se adiciona a la dilución agua hasta encherar.

Se utilizó 500 ml de electrolito por cada tratamiento, (10 % del peso de la muestra en ácido para humectar).

2.7.2 Medida del pH

El pH se registró utilizando el pHmetro, para lo cual se procedió a pesar 10 gr de muestra y se disolvió en 100 ml de agua destilada agitándose a intervalos de 5 min durante 30 minutos. Se dejó reposar y se mide el pH.

2.7.3 Humectación y preparación de la muestra

La humectación de la muestra se la elabora adicionando a la muestra ya pesada (200 gr) en un depósito, la cantidad de 20 ml de electrolito (10% del peso de la muestra) se la mezcla con la ayuda de una paleta durante 10 minutos. Después se la deja reposar durante el período de 6 horas antes de ubicarla en la celda de electrorremediación, para su respectivo tratamiento.

2.7.4 Calibración del equipo

- ✓ Ubicada la muestra en la celda de electrorremediación, se conecta los terminales en cada electrodo el positivo en el grafito y el negativo al del hierro.
- ✓ Se tiende a encender la fuente con un voltaje de 40V, que fue el voltaje utilizado para esta investigación. se considera este voltaje por investigaciones realizadas anteriormente.
- ✓ Los electrodos (grafito y hierro) deben ser lavados cada 4 horas después del tratamiento de electrorremediación durante de 20 segundos.

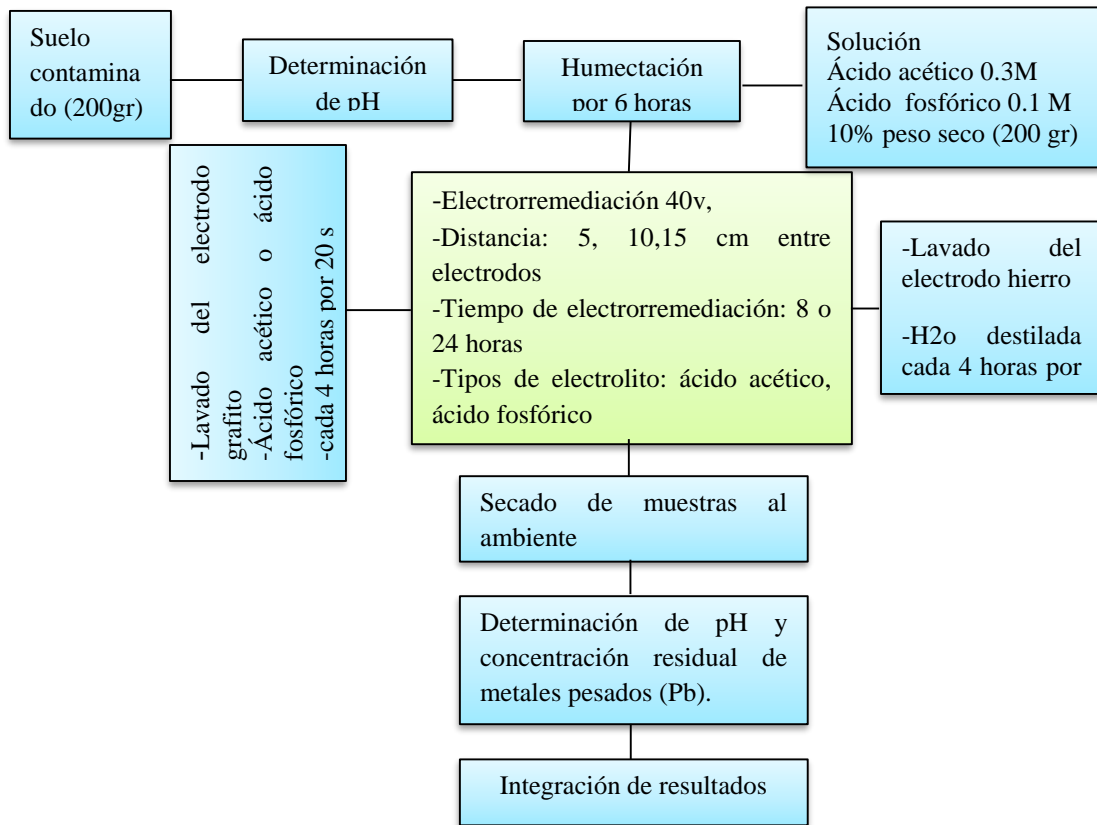


Figura 2-2. Esquema del proceso empleado en los experimentos

Realizado por: Eder Alcivar, 2017

2.8 Método estadístico

2.8.1 Diseño experimental

Factorial se refiere a un modo especial de formar combinaciones de tratamientos o factores. Un factor es una clase de tratamiento en que puede tener varios niveles. Se usan los experimentos factoriales en trabajos exploratorios, cuando no se conoce mucho sobre los niveles adecuados de un factor. Para la presente investigación se trabajó con el siguiente diseño Cuadro 2.

Factor A: Distancia entre los electrodos con 3 niveles $a_0 = 5\text{cm}$, $a_1 = 10\text{cm}$ y $a_2 = 15\text{cm}$

Factor B: Tiempo de recuperación con 2 niveles $b_0 = 8$ horas y $b_1 = 24$ horas

Factor C: Tipo de electrolito con 2 niveles $c_0 = \text{ácido acético}$ y $c_1 = \text{ácido fosfórico}$

Repeticiones R1, R2: Muestras de suelo contaminadas

Tabla 2-3. Formato para un diseño factorial 2^3 con sus niveles.

Combinación de Tratamientos	Repeticiones	
	Muestra de suelo	
	R1	R2
a0b0c0		
a0b0c1		
a0b1c0		
a0b1c1		
a1b0c0		
a1b0c1		
a1b1c0		
a1b1c1		
a2b0c0		
a2b0c1		
a2b1c0		
a2b1c1		

Fuente: Germán González, 1985 – El autor

CAPÍTULO III

3 MARCO DE RESULTADOS, DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Análisis de resultados

3.1.1 Caracterización del suelo

En el área contaminada donde se realizó la investigación se encontró un suelo de características facan (franco+ arcilloso+ limoso), con una humedad del 32,48 %, el pH del suelo contaminado es de 6,63 y el suelo presento un color marrón amarillento oscuro.

Los resultados de los metales pesados obtenidos de las muestras compuestas tanto del cadmio (Cd) y el níquel (Ni) no presentaron una concentración relevante para ser considerado como metales pesados, ya que presentaron concentraciones bajo la norma, pero en el caso del plomo (Pb) se presentó una concentración superior bajo la Norma Ecuatoriana De Calidad Ambiental Recurso Suelo. Considerándose un suelo contaminado con metales pesados.

Tabla 3-1. Resultados de la caracterización del suelo.

PARÁMETROS	MÉTODO DE ENSAYO	REFERENCIA	UNIDAD	RESULTADO
Color	ITE-AQLAB-61	Munsell soil color charts	~	10YR 4/6
Conductividad Eléctrica	ITE-AQLAB-53	EPA 9050 ^a	uS/cm	75,9
Humedad	ITE-AQLAB-57	ASTM D3976-92	%	32,48
Potencial de Hidrógeno	ITE-AQLAB-52	EPA 9045 D	~	6,63
Cadmio	ITE-AQLAB-33	EPA 3050B, SM 3030B, 3111B	mg/kg	< 1,17
Níquel	ITE-AQLAB-33		mg/kg	30,1
Plomo	ITE-AQLAB-33		mg/kg	3144,5
Textura	ITE-AQLAB-62	Gravimétrico	~	Franco Arcilla Limoso
Granulometría	ITE-AQLAB-74	> 2 mm	%	13,6
		> 1 mm	%	6,6
		> 0,5 mm	%	14,5
		< 0,5 mm	%	65,3

Elaborado por: Eder Alcivar.

Fuente: Laboratorio AQLAB.

3.1.2 Discusión de resultados

3.1.2.1 Resultados de los tratamientos.

Tabla 3-2. Condiciones de trabajo para cada uno de los siguientes tratamientos

Tratamientos	Tiempo de humectación (h)	Distancia entre electrodos (cm)	Tiempo de electrorremediación (h)	Tipo de electrolito
T1	6	5	8	Ac. Acético
T2	6	5	8	Ac. Fosfórico
T3	6	5	24	Ac. Acético
T4	6	5	24	Ac. Fosfórico
T5	6	10	8	Ac. Acético
T6	6	10	8	Ac. Fosfórico
T7	6	10	24	Ac. Acético
T8	6	10	24	Ac. Fosfórico
T9	6	15	8	Ac. Acético
T10	6	15	8	Ac. Fosfórico
T11	6	15	24	Ac. Acético
T12	6	15	24	Ac. Fosfórico

Elaborado por: Eder Alcívar

3.1.2.2 Resultados después del proceso de electrorremediación.

Tabla 3-3. Resultado de los análisis de muestras después del proceso de electrorremediación.

Tratamiento	pH inicial	pH final	Plomo (mg/kg)
			Promedio
T1	4,5	5,5	30,85
T2	4,5	5,05	23,25
T3	6,26	6,26	30,05
T4	5,82	5,82	25,15
T5	4,2	4,2	32,9

Tabla 3-3. (Continúa) Resultado de los análisis de muestras después del proceso de electrorremediación.

T6	3,5	3,5	22,25
T7	4,0	4,5	31,45
T8	3,5	3,5	28,5
T9	4,8	4,8	23,5
T10	6,15	6,15	25,85
T11	6,5	6,5	15,95
T12	3,0	3,0	15,1

Elaborado por: Eder Alcivar

La **Tabla 3-3** demuestra los resultados promedios obtenidos al investigar los diversos fragmentos de los suelos estudiados, una vez que el tratamiento de electrorremediación ha finalizado. Según lo indicado por las respuestas de la disposición de oxígeno e hidrógeno en el ánodo y el cátodo, individualmente, es normal que las secciones (distancias entre electrodos) más cercanas a las cámaras terminales estén influenciadas por los frentes ácidos y alcalinos creados allí. Que el tiempo de tratamiento y el tipo de electrolito utilizado para humedecer y lavar los terminales son determinantes para la viabilidad del procedimiento.

Teniendo en cuenta estos factores, se observa que el tratamiento T12 contiene la mayor capacidad de movilidad de metales pesados para el plomo. Observando el comportamiento mostrado por los suelos bajo estudio, al ser sometidos a un campo eléctrico durante un tiempo estimado se puede afirmar que existe una estrecha relación entre los factores involucrados (distancia entre las cámaras de electrodos, tiempo de proceso y tipo de electrolito).

Al observar el valor del pH antes y después de la aplicación del proceso, vemos que este se mantiene más o menos constante, por la humectación inicial que se realizó a cada uno de los tratamientos. El pH de la muestra tiene influencia en la acción del electrolito, como podemos observar hay muestras con pH cercanos al neutro (6 a 6.5) donde hay menor eficiencia de eliminación de contaminación.

Tabla 3-4. Concentración media del plomo (ppm)

Electrolito	Tiempo (h)	Distancia (cm)		
		5	10	15
Ácido	8	30,850	32,900	23,500
Acético	24	30,050	31,450	15,950
Ácido	8	23,250	22,250	25,850
Fosfórico	24	25,150	28,500	15,100

Elaborado por: Eder Alcivar

3.1.2.3 Concentración media de plomo en función de las variables

Tabla 3-5. Concentración media del Pb en función del electrolito

Electrolito	[Pb] (ppm)
Ácido acético	27,450
Ácido fosfórico	23,350
F. ANOVA	3.456 NS

Elaborado por: Eder Alcivar

La tabla N^o 3-5 nos indica que entre el ácido acético y fosfórico no existen diferencias significativas entre las concentraciones medias de plomo.

Tabla 3-6. Concentración media del Pb en función del tiempo

Tiempo (h)	[Pb] (ppm)
8	26,433
24	24,367
F. ANOVA	0,786 NS

Elaborado por: Eder Alcivar

La tabla N^o 3-6 nos indica que entre el tiempo de electrorremediación de 8 y 24 horas no existen diferencias significativas entre las concentraciones medias de plomo.

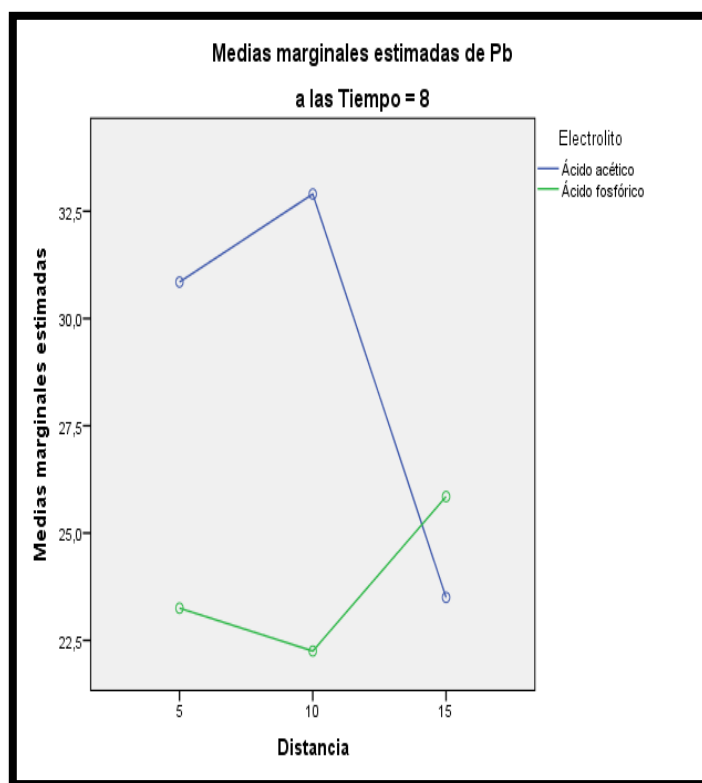
Tabla 3-7. Concentración media de Pb en función de la distancia

Distancia	[Pb] (ppm)
5	27,325 b
10	28,775 b
15	20,100 a
F. ANOVA	9,126 **

Elaborado por: Eder Alcivar

La tabla N^o3-7 nos indica que entre las distancias 5, 10, 15cm, si existen diferencias significativas entre las concentraciones medias de plomo. Ya que la distancia es la que influye en la disminución de la concentración residual de plomo.

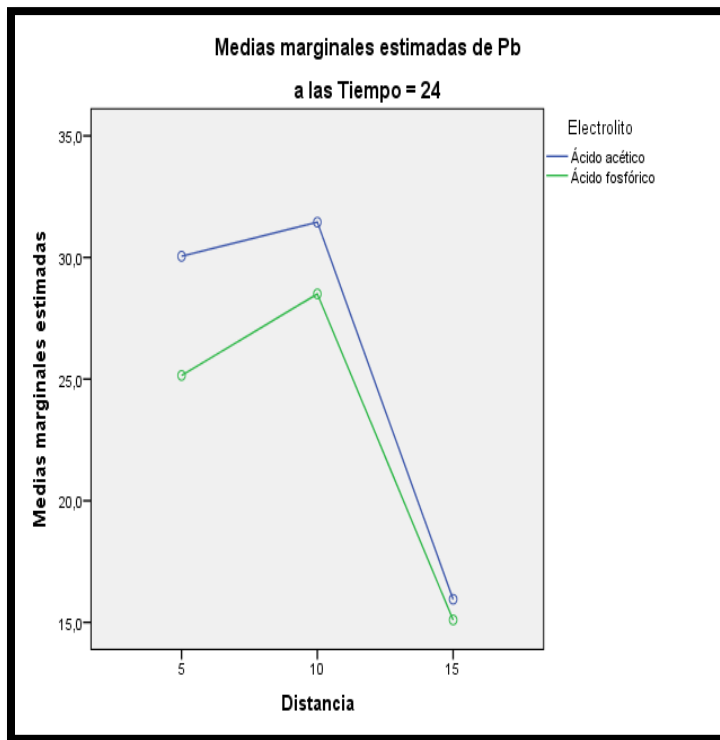
3.1.2.4 Gráficos comparativos



Gráfica 3-1. Gráfica del plomo en relación Distancia * Electrolito * Tiempo (8 h)

Elaborado por: Eder Alcivar

La relación de las gráficas del plomo nos indica que a un tiempo de 8 horas con la ayuda del electrolito ácido fosfórico y a una distancia de 10 cm se obtiene menos concentración residual de plomo que utilizando un tiempo de 8 horas con electrolito ácido acético y a una distancia 5 ,15 cm.



Gráfica 3-2. Gráfica del plomo en relación Distancia * Electrolito * Tiempo (24 h)

Elaborado por: Eder Alcivar

La relación de las gráficas del plomo nos indica que a un tiempo de 24 horas con la ayuda del electrolito ácido fosfórico y a una distancia de 15 cm se obtiene menos concentración residual de plomo que utilizando un tiempo de 24 horas con electrolito ácido acético y a una distancia 5 ,10 cm. Cabe recalcar que la distancia es la que influye en la disminución de la concentración residual del plomo en las muestras ya que es inversamente proporcional a mayor distancia menor concentración de plomo en las muestras y mayor tiempo de tratamiento .

3.2 Criterios de remediación o restauración del suelo

Los criterios de remediación o restauración se construyen según lo indicado por la utilización que se le da al suelo: agrícola, comercial, residencial e industrial, y tienen el motivo de establecer los mayores niveles de concentración de contaminantes de un suelo durante el tiempo de remediación o restauración. Analizando la Norma Ecuatoriana de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de Remediación para Suelos Contaminados Anexo 6 y la Tabla 5, observamos que los resultados obtenidos del plomo están por debajo de los niveles máximos de concentración permitidos después del proceso de remediación.

Tabla 3-8. Análisis comparativo Norma Ecuatoriana de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y los resultados del proceso de electrorremediación.

Realizado por: Eder Alcivar

VALORES MÁXIMOS SEGÚN LA NORMA ECUATORIANA DE CALIDAD AMBIENTAL RECURSO SUELO					
Sustancia parámetros generales	Unidades	USOS DEL SUELO			
		Agrícola (A)	Residencial (R)	Comercial (C)	Industrial (I)
pH		6 a 8	6 a 8	6 a 8	6 a 8
Plomo	mg / kg	100	100	150	150
RESULTADOS OBTENIDOS DESPUES DEL PROCESO DE ELECTRORREMEDIACIÓN					
Datos	pH	Tipo de electrolito	Distancia	Tiempo	Valores del Plomo (mg/kg)
1	5,5	Ac. Acético	5 cm	8 horas	31,2
2	5,05	Ac. Fosfórico	5 cm	8 horas	22,8
3	6,26	Ac. Acético	5 cm	24 horas	29,9
4	5,82	Ac. Fosfórico	5 cm	24 horas	24,9
5	4,2	Ac. Acético	10 cm	8 horas	33,2
6	3,5	Ac. Fosfórico	10 cm	8 horas	22,8
7	4,5	Ac. Acético	10 cm	24 horas	30,6
8	3,5	Ac. Fosfórico	10 cm	24 horas	29,5
9	4,8	Ac. Acético	15 cm	8 horas	24,2
10	6,15	Ac. Fosfórico	15 cm	8 horas	26,2
11	6,5	Ac. Acético	15 cm	24 horas	15,1
12	3,0	Ac. Fosfórico	15 cm	24 horas	14,9
13	5,5	Ac. Acético	5 cm	8 horas	30,5
14	5,05	Ac. Fosfórico	5 cm	8 horas	23,7
15	6,26	Ac. Acético	5 cm	24 horas	30,2
16	5,82	Ac. Fosfórico	5 cm	24 horas	25,4
17	4,2	Ac. Acético	10 cm	8 horas	32,6
18	3,5	Ac. Fosfórico	10 cm	8 horas	21,7
19	4,5	Ac. Acético	10 cm	24 horas	32,3
20	3,5	Ac. Fosfórico	10 cm	24 horas	27,5
21	4,8	Ac. Acético	15 cm	8 horas	22,8
22	6,15	Ac. Fosfórico	15 cm	8 horas	25,5
23	6,5	Ac. Acético	15 cm	24 horas	16,8
24	3,0	Ac. Fosfórico	15 cm	24 horas	15,3

CONCLUSIONES

- ✓ Los resultados obtenidos en la caracterización de suelo presentaron una contaminación de plomo (Pb) que supero los límites permisibles establecidos en la Norma de Calidad Ambiental Recurso Suelo Anexo 6, con una concentración de 3144,5 mg/kg considerándolo como metal pesado, mientras que la concentración del níquel (Ni) y el cadmio (Cd), fueron inferiores a los límites permisibles establecidos en dicha norma como para considerarlos como metales pesados.
- ✓ La electrorremediación tiene un gran potencial para descontaminar diversos tipos de suelos contaminados con compuestos orgánicos e inorgánicos en un amplio rango de concentraciones. En la presente investigación teórica y de laboratorio se han trabajado con tres de los factores involucrados (distancia entre electrodos, tiempo de remediación y tipo de electrolito) obteniéndose buenos resultados, que permiten deducir que la electrorremediación es una técnica alternativa con gran eficiencia en la recuperación de suelos.
- ✓ Las pruebas de extracción de plomo del suelo muestran que el proceso se ve afectado por diversas variables como son: la distancia entre electrodos, tiempo de remediación y tipo de electrolito. Los resultados muestran que se puede realizar el proceso de electrorremediación combinando tres factores frente a la cantidad remediada en plomo. En esta investigación se logran porcentajes de extracción considerables, lográndose porcentajes de 99,9% para el plomo.
- ✓ El tratamiento T12 con la relación del tiempo de 24 horas con la ayuda del electrolito ácido fosfórico y a una distancia de 15 cm es el más óptimo para la disminución del plomo, pero cabe recalcar que la distancia es la que influye en la disminución de la concentración residual del plomo en las muestras ya que es inversamente proporcional a mayor distancia menor concentración de plomo en las muestras.

- ✓ Al realizar la humectación con electrolitos ácidos se mantuvo el pH de las muestras que eran ácidas, esto logro que los resultados dieran efectividad en la técnica permitiendo mantener los contaminantes en solución lo cual facilita el proceso de electromigración de los metales.

RECOMENDACIONES

- ✓ La caracterización del suelo debe realizarse de manera adecuada y cubriendo la mayor extensión del sitio, realizando un muestreo que abarque todo el lugar para obtener muestras representativas.
- ✓ Es importante seguir tomando en cuenta otros factores de versatilidad como: tipos de electrolitos, tiempos de electrorremediación, variación de voltajes, tiempos de humectación y distancia entre electrodos para futuras investigaciones.
- ✓ Es fundamental darle una disposición final al suelo recuperado, por lo tanto se debe ubicar el suelo recuperado en maceteros para la siembra de plantas ornamentales.
- ✓ Todavía es necesario avanzar en las investigaciones en "in situ" para tener un mejor entendimiento de los fenómenos de transporte de metales involucrados y así obtener altas eficiencia de remediación en campo.

BIBLIOGRAFÍA

Al-Hamdan, A. &, Reddy, K. Transient behavior of heavy metals in soils during electrokinetic remediation. [En línea] abril de 2008. [Consultado el: 8 de noviembre de 2017.] https://www.researchgate.net/publication/5694437_Transient_behavior_of_heavy_metals_in_soils_during_electrokinetic_remediation.

Bautista Francisco. *Técnica de muestreo para manejadores de recursos naturales, Puebla México: Mundi-Prensa* [En línea] 16 de junio de 2011. pp.150-156.

Bayona Romero, B. N. *Tratamiento biológico del agua residual procedente de una industria. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales.* 2009. pp. 180-185.

Celis Rosas, Mijael Antonio. *Tecnología de Electroremediación.* [En línea] 2015. [Consultado el: 20 de noviembre de 2017.] <https://es.scribd.com/document/325432667/Electroremediacion-de-Suelos-Contaminados-Con-Metales-Pesados>.

Ciencias Ambientales. *Propiedades del suelo. Potencial de oxidación.* [En línea] 11 de mayo de 2006. [Consultado el: 15 de noviembre de 2017.] <https://www.eweb.unex.es/eweb/edafo/ECAP/ECAL5PFQPotRedox.htm>.

García Hernández Laura, et al. *Electrorremediación de suelos arenosos contaminados por Pb, Cd y As provenientes de residuos mineros, utilizando agua y ácido acético como electrolitos.* [En línea] 26 de febrero de 2011. [Consultado el: 10 de noviembre de 2017.] http://smcsyv.fis.cinvestav.mx/supyvac/24_1/SV2412411.pdf.

JICA. *El suelo y su importancia.* [En línea] [Consultado el: 21 de noviembre de 2017.] <http://www.importanciade.org/suelo/>.

Morales Fonseca Diana Milena. *Determinación de la capacidad de remoción de cadmio, plomo y níquel por hongos de la podredumbre blanca inmovilizados.* [En línea] julio de 2008. [Consultado el: 25 de noviembre de 2017.] <http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ciencias/tesis148.pdf>.

Ramírez, et al. 2007. *Electrorremediación de suelos contaminados, una revisión técnica para su aplicación en campo, Puebla México: Mundi-Prensa* [En línea] 05 de marzo de 2007. pp. 125-130.

Romero Zarazúa, María Fernanda. 2005. *Evaluación de contaminantes metálicos dispersos en una empresa metal-mecánica de Puebla y su posible relación con efectos toxicológicos.* [En línea] 07 de mayo de 2005. [Consultado el: 05 de noviembre de 2017.] http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lqu/romero_z_mf/.